

УДК 621.822.3

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННЫХ МАЯТНИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ (СЕЙСМОИЗОЛЯТОРОВ)

© 2009 Ю. Н. Дроздов<sup>1</sup>, В. А. Надеин<sup>2</sup>, В. Н. Пучков<sup>1</sup>, М. В. Пучков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва

<sup>2</sup>НГБ «Энергодиагностика», г. Москва

Фрикционные маятниковые подшипники (ФМП) имеют универсальные свойства, удовлетворяющие различным требованиям при эксплуатации зданий, мостов и промышленных сооружений. Могут быть обеспечены динамические периоды колебаний от 1 до 5 с, смещения до 1,5 м, высокая несущая способность и демпфирование. Подшипники могут выдерживать вертикальную нагрузку до 13,5 тыс. тонн и имеют минимальную стоимость конструкции. В работе представлены сведения о влиянии землетрясений и других силовых воздействий на тепловые свойства и трибологические характеристики ФМП, применяемых в качестве сейсмоизоляторов на нефтяных платформах проекта «Сахалин-2».

*Землетрясения, сейсмоизоляция, трение, маятниковые подшипники скольжения, антифрикционные материалы, трение, тепловое состояние, долговечность*

Землетрясение (по-гречески «сеймос») – это явление, проявляющееся в виде толчков и упругих колебаний земной поверхности, возникающих вследствие разрядки напряжений, чрезмерно накопившихся в очаге землетрясения [1-3].

Землетрясение занимает одно из первых мест среди природных катастроф по разрушениям, числу жертв, деструктивному воздействию на среду.

Понятие сейсмического риска – это вероятность потерь от землетрясений за определенный промежуток времени в соответствии с сейсмической опасностью и уязвимостью объектов (число возможных жертв, экономический и экологический ущерб и т.п.).

Методы прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) можно разделить на два вида:

- методы прогнозирования возникновения ЧС;
- методы прогнозирования последствий ЧС.

Интегральными показателями риска ЧС являются частоты – математическое ожидание числа ЧС в год и математическое ожидание ущерба от ЧС в год.

Распространение деформаций имеет волновой характер. Объемные волны: продольные, которые на сейсмограммах регистрируются первыми, поэтому обозначаются символом  $P$  (от англ. primary – первичные), и поперечные регистрируемые вторыми,

обозначаемые символом  $S$  (от англ. secondary – вторичные).

Поверхностные волны: Рэлея и Лява. Поверхностные волны Рэлея и Лява образуются сложными колебаниями частиц поверхности Земли – для волн Лява плоскость эллипсов ориентирована горизонтально, для волн Рэлея – вертикально. В целом колебания частиц Земли напоминают эллипсы.

Скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн выражаются:

$$\text{ся: } V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}},$$

где  $E$  - модуль Юнга,  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $\rho$  - плотность горной породы.

Отношение  $\frac{V_p}{V_s} = 1,3...1,6$  (для боль-

шинства горных пород, высоко-пористых газонасыщенных), 1,5...2 (для цементированных скальных или водо- и нефтенасыщенных пород), 2...3 (для рыхлых, плохо цементированных пород типа песков, глин).

Интенсивность толчка – это мера проявлений колебаний и разрушений, вызванных землетрясением по мере удаления от очага (т.е. картина пространственного затухания энергии землетрясения), магнитуда – мера высвобожденной при толчке энергии сейсмических волн [1-4]. Магнитуда ( $M$ ) является наиболее универсальной и физически обоснованной характеристикой землетрясе-

ния. Это безразмерная величина, характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызванных землетрясением, которая находится в пределах от 0,0 до 9,0.

Первая шкала магнитуд землетрясений была предложена в 1935 г. Ч.Ф. Рихтером. В настоящее время используется несколько магнитудных шкал.

Энергия землетрясений ( $E$ ) – это величина потенциальной энергии, которая освобождается в виде кинетической энергии после разрядки напряжений в очаге и, достигая поверхности Земли в виде упругих сейсмических волн, вызывает колебания.

Для расчетов упругой энергии с 1956 г. пользовались эмпирической зависимостью Гутенберга – Рихтера:

$$\lg E = b + aM,$$

где  $E$  – энергия, эрг,  $M$  – сейсмическая магнитуда. Для сильных землетрясений  $b = 11,8$ ;  $a = 5$ , для слабых  $b = 11$ ;  $a = 1,8$ .

Интенсивность ( $I$ ) сотрясений по 12<sup>ти</sup> – балльной шкале может быть определена:

$$I = a + bM + c \lg C,$$

где  $M$  – магнитуда землетрясения,  $C$  – гипоцентральное расстояние,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – региональные константы. Для территории России константы:  $a = 3$ ,  $b = 1,5$ ,  $c = 3,5$ .

Интенсивность сейсмических колебаний грунта на поверхности Земли измеряется в баллах.

Для оценки интенсивности используют шкалы интенсивности: MSK, Росси-Фореля, модифицированную шкалу Меркалли и др. Интенсивность сейсмических колебаний  $I$  на поверхности определяется шкалой интенсивности.

Магнитуда и энергия характеризуют силу землетрясения в его очаге.

#### **Физические параметры колебаний.**

Строителей интересует, в первую очередь, физические параметры колебаний, такие как величина смещения грунта, скорость смещения, ускорение, а также спектральный состав и длительность.

Интенсивность землетрясений зависит от его силы, глубины залегания очага, качества грунтов, может быть определена по двенадцатибалльной Международной сейсмической шкале MSK-64 (шкале Меркалли).

Сейсмическая опасность при землетрясениях определяется интенсивными колебаниями грунта и вторичными явлениями: лавины, оползни, обвалы, опускание и перекосы земной поверхности, разжижение грунта, наводнениями при разрушении и прорыве плотин, защитных дамб, пожарами и др.

Сейсмическая шкала используется для оценки интенсивности землетрясения на поверхности Земли.

Причиной землетрясений служат тектонические движения, происходящие в толще Земли.

При землетрясении в очаге возникает целый комплекс колебательных движений, в систему которых вовлекаются поочередно все более и более удаленные от очага частицы. В этом сложнейшем комплексе колебаний некоторые проявляются особенно ярко и в значительной степени определяют форму сейсмограмм. Это – продольные волны, распространяющиеся по толще земного шара со скоростью  $V_p$ , достигающей 7-14 км/с. Их можно понимать как реакцию среды на внезапное изменение объема.

Поперечные волны распространяются по толще Земли со скоростью  $V_s$ , равной 4...10 км/с. При поперечных волнах частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной к направлению сейсмического луча.

При продольных волнах частицы колеблются в направлении распространения волны, т.е. в направлении от очага колебаний к периферии, вдоль так называемого сейсмического луча.

Продольные волны являются следствием сопротивляемости среды изменению объема, для всех агрегатных состояний вещества (твердых, жидких, газообразных).

Поперечные волны возникают в результате сопротивления среды изменениям формы, распространяются только в твердых телах, определяются формулами:

$$V_p = \sqrt{K + 4,3\mu / \rho}$$

$$V_s = \sqrt{\rho\mu}$$

где  $K$  – модуль всестороннего сжатия;

$\mu$  – модуль сдвига;  $\rho$  – плотность среды.

Параметры поражающих факторов землетрясений определяют следующим образом.

Интенсивность землетрясения, выраженную в баллах, рассчитывают по формуле:

$$I_{\delta} = 1,5M - 3,6 \lg \sqrt{R^2 + h^2} + 3,$$

где  $I_{\delta}$  - интенсивность землетрясения, баллы;

$M$  - магнитуда;

$R$  - эпицентральное расстояние, км;

$h$  - глубина очага, км.

Максимальная интенсивность землетрясения может быть выражена:

$$I_{\delta} = 1,5M - 3,6 \lg + 3.$$

**Новая шкала оценок сейсмической интенсивности Р.Ш. Инагамова [5]:**

Функциональная зависимость К. Рихтера и Б. Гутенберга, шкала сейсмических ускорений грунта имеет вид:

$$\lg a = \frac{I}{3} - 0,5. \quad (1)$$

При значении сейсмической интенсивности, например,  $I = 9$  баллов  $a = 311 \text{ см/с}^2$ , по шкале Канкани  $a = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Зависимость С.В. Медведева (1952 г.):

$$\lg a = 0,3I - 0,1. \quad (2)$$

Для 9 баллов  $a = 398 \text{ см/с}^2$ . Ф. Ньюман получил зависимость:

$$\lg a = 0,308I - 0,041. \quad (3)$$

По ней для 9 баллов  $a = 538 \text{ см/с}^2$ .

По шкале Д. Гершбергера (1956 г.):

$$\lg a = 0,428I - 0,9. \quad (4)$$

Для  $I = 9$  балла  $a = 895 \text{ см/с}^2$ .

По зависимости С. Петершмитта (1961 г.):

$$\lg a = 0,5I - 1,35, \quad (5)$$

$I = 9$  баллов соответствует ускорению  $a = 1413 \text{ см/с}^2$ .

Широко известны японские 7 - балльные шкалы, которые уточняются более 50 лет. Шкала Омори разрабатывалась 30 лет, опубликована лишь в 1920 г. М. Ишимото в 1932 г. предложил новую шкалу, Х. Кавасуми в 1952 г. получил зависимость:

$$\lg a = 0,5I - 0,35. \quad (6)$$

По ней при интенсивности  $I = 6,1$  балла  $a = 510 \text{ см/с}^2$ , что соответствует приблизительно 9 балла по шкале ММ.

Больше всего отличаются друг от друга шкала Канкани и Петершмитта - для 9 баллов по шкале Канкани  $a = 100 \text{ см/с}^2$ , по шкале Петершмитта  $a = 1413 \text{ см/с}^2$ .

Для корректной и точной оценки сейсмической опасности и сейсмического риска на территории сейсмоактивных регионов Р.Ш. Инагамов предлагает новую шкалу оценок сейсмической интенсивности (ШОСИ), представляя сейсмическую интенсивность как меру действия сейсмических волн на приповерхностный грунт земли, который оказывает динамические воздействия на объекты, расположенные на (и в) грунте. Доминирующая роль отводится инструментальным измерениям в оценке сейсмического эффекта.

В основу разработки новой версии ШОСИ Р.Ш. Инагамов принял подход к пониманию сейсмической интенсивности совместно с использованием определенных функциональных зависимостей, характеризующих соотношения между кинематическими параметрами движения грунта ( $a$ ,  $v$ ,  $d$ ) ( $a$  - ускорение,  $v$  - скорость,  $d$  - смещение) и уровнем сейсмической интенсивности. Учитывается адекватно уязвимость объектов при различных уровнях сейсмической интенсивности. В предлагаемой ШОСИ использовалась степенная формула:

$$U = f(2^I - 1), \quad (7)$$

где  $U$  - определяющий кинематический параметр колебаний грунта.

Для каждого из параметров  $a$ ,  $v$ ,  $d$  в соответствии с их физическим смыслом зависимость (7) имеет определенный смысл:

$$a = 2^I - 1, \quad (8)$$

$$v = (2^I - 1) \left( \frac{T}{2\pi} \right), \quad d = (2^I - 1) \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2,$$

где  $T$  - преобладающий период колебаний.

Сопоставленные табулированные значения ускорений  $a$  (табл. 1) показывают, что предлагаемая Р.Ш. Инагамовым шкала близка к основным, используемым в мире, ШОСИ. ММ используется на Американском, Австралийском и Африканском континентах и частично в Европе и Азии; MSK используется на Евроазиатском континенте.

Предложенная ШОСИ близка к шкале Ньюмана. Для определения дробных значений параметров смещения -  $d$ , скорости -  $v$ , ускорения -  $a$ . Колебания грунта можно использовать логарифмическую зависимость вида:  $\lg(U + I) = I \cdot \lg 2$  или  $\lg(U + I) = 0,3I$ .

Таблица 1 - Значения ускорений движения грунта в различных ШОСИ

Сейсмичн. интен-сивность	Значения ускорений $a$ (см/с <sup>2</sup> )								
	По функциональной зависимости							По MSK	По ММ
	(8)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)*		
0	0	**	**	**	**	**	**	0 (..)	0
1	1	**	1,58	1,85	**	**	1,41	1-2 (..)	0,5 - 0,97
2	3	1,44	3,2	3,76	**	**	4,47	3-4 (..)	0,98 - 3,35
3	7	3,16	6,3	7,64	2,42	1,41	14,13	5-8 (..)	3,36 - 8,85
4	15	5,25	12,6	15,52	6,48	4,46	44,67	9-15 (..)	6,86 - 16,6
5	31	14,13	25,12	31,55	17,38	14,13	141,3	16-30 (..)	16,7 - 33,2
6	63	31,68	50,12	64,12	46,56	44,67	446,7	31-60 (.)	33,3 - 68,5
7	127	64,57	100	130,3	124,7	141,3	1413	61-120 (.)	68,4 - 146
8	255	138	200	264,9	334,2	446,7		121-240 (.)	147 - 322
9	511	316	398	583,6	895,4	1413		241-480 (.)	323 - 685
10	1023	631	794	1094	2400	4467		481-960 (.)	686 - 1469
11	2047	1350	1585	2223	6427	14130		961-1920 (..)	1470 - 3135
12	4095	2884	3162	4529	17220	44670		1921-3840 (..)	3136 - 4900

\* - соответствует японской 7-балльной шкале Х.Кавасуми.

\*\* - не могут быть определены.

(.) – по информации из работы: «Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности».

М.: Наука, 1975. С. 280.

(..) – экстраполяция авторов.

Для значения сейсмической интенсивности, большей 3, можно также использовать упрощенный вид зависимости:  $\lg U = I \lg 2$  или  $\lg U = 0,3I$ .

Разработка новой шкалы оценок сейсмической интенсивности обеспечивает возможность выполнения как целостных, так и дробных значений сейсмической интенсивности.

Значения ускорений движения грунта по различным зависимостям указаны в таблице 1.

#### Фундаментальное волновое уравнение

Волновое уравнение, описывающее распространение волн в среде, имеет вид:

$$\square u = \Delta u \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

где  $u = u(x, y, z, t)$  - функция, характеризующая возмущение среды в точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ ;  $\square$  - оператор Д'Аламбера;  $\Delta$  - оператор Лапласа;  $c$  - параметр с размерностью скорости;  $t$  - время;  $x, y, z$  - пространственные декартовы координаты.

Линейное однородное дифференциальное уравнение в частных производных допускает разделение переменных по координатам и времени  $u = u(x, y, z)\varphi(t)$ . При гармонической зависимости от времени, вы-

раженной с помощью комплексной записи  $\phi = e^{i\omega t}$ , где  $\omega = kc$ ,  $k$  - волновое число. Волновое уравнение превращается в уравнение Гельмгольца:  $\Delta u + k^2 u = 0$ , которое в двухмерном случае дает уравнение мембраны, в одномерном - уравнение осциллятора [7].

Если в правой части стоит заданная функция координат и времени  $\square u = f(x, y, z, t)$ , в отличие от однородного волнового уравнения, помимо собственных решений - нормальных волн, имеется и вынужденное решение, описывающее движение, возбужденные источниками.

Волны переносят энергию без переноса вещества. При гармонических колебаниях изменение колеблющейся величины  $u$  во времени описывается в каждой точке зависимости:  $u = A \sin \frac{2\pi t}{T}$ , где  $t$  - время,  $A$  - амплитуда,  $T$  - период одного полного цикла колебания. Величину, обратную периоду и равную числу колебаний в единицу времени называют частотой  $\nu = \frac{1}{T}$ . Круговая или циклическая частота  $\omega = 2\pi\nu$ .

Комплексная запись синусоидальных колебаний имеет вид:

$$u(t) = Ae^{i\omega t} = A \cos(\omega t + \phi_0) + iA \sin(\omega t + \phi_0).$$

Для затухающего колебания  $u(t) = Ae^{-\alpha t} e^{i\omega t}$ , где  $\alpha$  - коэффициент затухания. Декремент затухания  $\delta = \alpha T$ .

Колебания гармонического осциллятора (маятника) под действием периодической силы  $F = F_o \cos \omega t$  ( $F$  - внешняя периодическая сила изменяется с частотой  $\omega$ ). Резонанс наступает, когда  $\omega = \omega_o$ . При наличии диссипации энергии можно выразить:

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} + \omega_o^2 x = f_o \cos ut,$$

применительно к маятнику:

$$\omega_o^2 = \frac{g}{l}; \quad \alpha = \frac{\gamma}{M}; \quad f_o = F_o / M$$

где  $l$  - длина подвеса;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $\gamma$  - постоянный коэффициент;  $M$  - масса;  $F_o$  - сила;  $\omega_o$  - частота собственных колебаний системы.

Решение уравнения, описывающего установившиеся вынужденные колебания:

$$x = x_o \cos(\omega t + \phi),$$

где  $tg\phi = \frac{\alpha\omega}{\omega_o^2 - \omega^2}$ .

Стационарная амплитуда этих колебаний:

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} + \omega_o^2 x = f_o \cos ut.$$

Если отклонения маятника малы, он совершает колебания, близкие к гармоническим, с периодом:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $l$  - длина нити (стержня),  $T$  - период колебаний, не зависит от амплитуды и силы тяжести.

Маятник совершает изохронные колебания. Если колеблющееся тело рассматривают как материальную точку, то маятник называют математическим.

В случае физического маятника, последний представляет собой твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг горизонтальной оси подвеса. Физический маятник при малых отклонениях также совершает колебания, близкие к гармоническим, с периодом:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{Mgl}},$$

где  $J$  - момент инерции маятника относительно оси подвеса,  $l$  - расстояние от оси подвеса до центра тяжести,  $M$  - масса маятника. Период колебаний физического маятника совпадает с периодом колебаний такого математического маятника, который имеет длину  $l_o = \frac{J}{Ml}$  - проведенная длина данного физического маятника.

### Применение фрикционных маятниковых подшипников (сейсмоизоляторов)

Реальная возможность применения маятниковых опор скольжения как эффективного средства для поглощения энергии внешних силовых воздействий появилась в последние 30...40 лет, благодаря развитию новых технологий (в особенности в связи с развитием космических исследований в СССР и США) и появлению новых триботехнических материалов (таких как антифрикционные самосмазывающиеся тканые волокнистые материалы).

Первоначально при строительстве мостов, зданий, цистерн и др. сооружений с целью компенсации механических, тепловых и сейсмических воздействий в период их эксплуатации предпринимались попытки применения простых самосмазывающихся (немаятниковых) опор скольжения. За период с 1968 года по 1984 год в СССР, США, Великобритании, Германии, Франции и Японии было опубликовано более 40 авторских свидетельств и патентов, в которых описаны самосмазывающиеся подшипники скольжения с антифрикционными волокнистыми материалами в качестве вкладыша, находившие применение в строительстве крупных промышленных сооружений. В 1987 году появилось первое описание фрикционного маятникового подшипника скольжения, заявленного в качестве нового средства сейсмической изоляции крупных сооружений [8].

В настоящее время фрикционные маятниковые подшипники скольжения (ФМП) довольно широко используются при строительстве сооружений в сейсмоактивных зонах Америки и Японии в качестве демпферов (изоляторов) для защиты поддерживаемой конструкции от повреждений, возникающих в результате землетрясе-

ний, а также от силовых воздействий иного рода (ветер, тепловые деформации, ледовые и волновые нагрузки) [9,10].

По изложению американских исследователей (М. Апоор и др.) самое большое в мире здание с изолированным основанием (построенное в конце XX века) - новый международный аэровокзал в аэропорту Сан-Франциско может выдержать землетрясение до 8 баллов по шкале Рихтера благодаря 267 фрикционным маятниковым подшипникам скольжения – сейсмическим изоляторам. Анализ показал, что сейсмическая изоляция дала бы лучшие результаты по уменьшению сдвига основания, удовлетворению требованиям к податливости, перемещению и ожидаемому повреждению. Изоляция также обеспечила наименьшую стоимость конструкции для достижения требуемых сейсмических характеристик.

Была проведена оценка трех систем изоляции: фрикционных маятниковых подшипников (ФМП), свинцово-резиновых подшипников и подшипников из резины с высокой способностью к демпфированию – для одного и того же уровня сдвига сооружения и связанных затрат на конструкцию.

Фрикционная маятниковая система имела наименьшую стоимость. Система изоляции основания главных зданий аэровокзала из 267 ФМП допускала поперечные перемещения в 508 мм и позволяла рассчитывать энергию пиковых перемещений грунта при землетрясении. Подшипники из литой стали включают сферическую вогнутую поверхность из нержавеющей стали и шарнирный ползун, которые обеспечивают период колебаний сейсмической изоляции 3 с и снижают требования к силе землетрясения на 70%. В областях, прилегающих к главному зданию, сейсмические связи воспринимают от 508 до 864 мм горизонтальных и 50 мм вертикальных перемещений.

Сейсмическая изоляция может снизить сейсмические нагрузки на цистерны в 3...5 раз (V.A. Zayas, S.S. Low).

ФМП имеют свойства, которые выгодны при применении для сейсмической изоляции цистерн. Естественный период колебаний подшипников не зависит от массы жидкости, температуры, возраста подшипников. Материалы подшипников устойчивы

к воздействию химических веществ, огня и предельных температур. Высокие коэффициенты запаса по прочности реализуются при смещении подшипника, чтобы противостоять суммарным воздействиям поперечных и вертикальных толчков и опрокидывающим моментам.

Принцип действия маятникового подшипника скольжения продемонстрирован на рис 1.

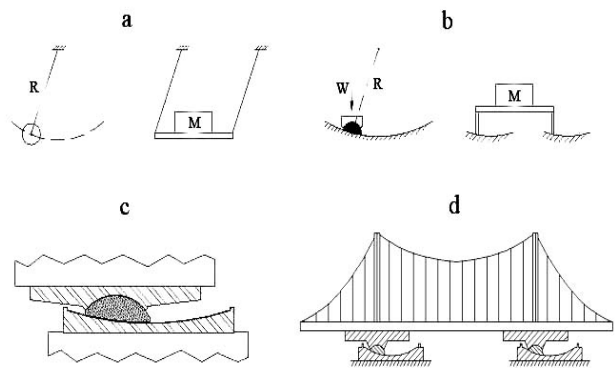


Рис. 1. Принцип действия маятникового подшипника скольжения – сейсмоизолятора:

a – колебания гравитационного маятника с одной и двумя точками подвеса; b – маятниковые колебания при скольжении сферического ползуна вдоль сферической поверхности; c – маятниковый подшипник; d – мост с опорами на маятниковых подшипниках

Действие подшипника одинаковое, независимо от того, будет ли вогнутая поверхность обращена вверх или вниз. Свойства ФМП могут изменяться в широком диапазоне. Увеличение периода скольжения снижает силу сдвига и увеличивает смещение. Изменение коэффициента трения от 0,10 до 0,05 понижает силу сдвига и увеличивает смещение. Схематическое изображение реальной конструкции ФМП представлено на рис. 2. Плита со сферической вогнутой поверхностью установлена наверху из соображений удобства в эксплуатации.

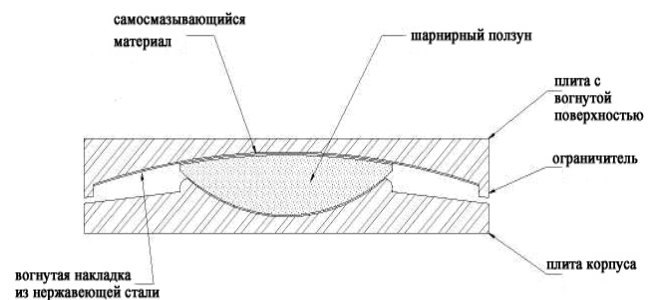


Рис. 2. Схема устройства фрикционного маятникового подшипника (ФМП)

Полусферическая конструкция шарнирного ползуна позволяет получить относительно однородное распределение давлений под шарнирным ползуном, что снижает прерывистое движение и предотвращает возникновение высокого локального давления в подшипнике.

На рис. 3 представлены свойства ФМП, зависящие от величины сил трения, конструктивных параметров и вертикальной нагрузки [9,10].

Фрикционные маятниковые подшипники можно моделировать как двухлинейные гистерезисные элементы. Боковая восстанавливающая жесткость ФМП равна,

$$K = W/R,$$

где  $W$  - поддерживаемый вес,  $R$  - радиус кривизны вогнутой поверхности

Собственный период горизонтальных колебаний опоры с маятниковым подшип-

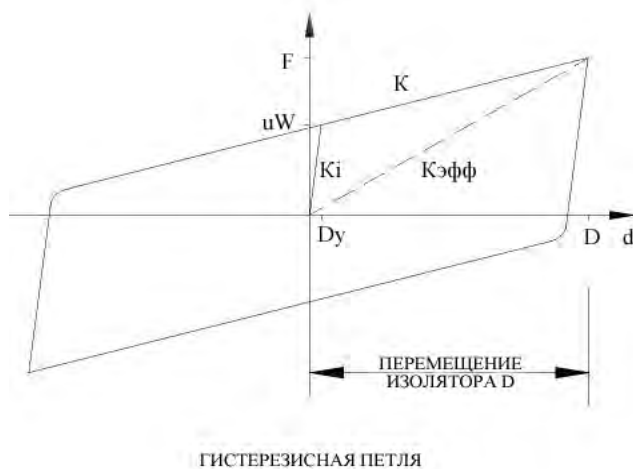
ником скольжения определяется из уравнения маятника и равняется:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g},$$

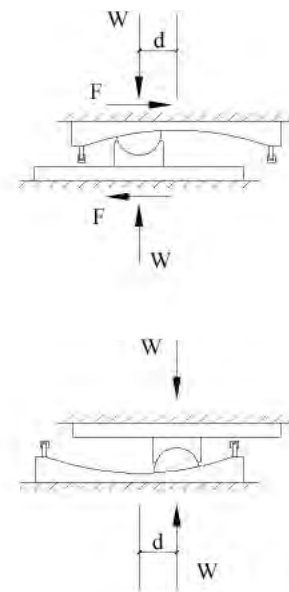
где  $l$  есть длина радиуса кривизны  $R$  (эквивалентная длина маятника), а  $g$  ускорение свободного падения. Это уравнение является достаточно точным при отклонениях маятника до  $45^\circ$ , что значительно больше, чем предельный угол отклонения радиуса сферической поверхности ФМП.

Когда ползун перемещается по вогнутой поверхности, заставляя поддерживаемую массу подниматься, составляющая силы тяготения, параллельная поверхности (сдвигающая сила), стремится вернуть его в исходное состояние и обеспечивает жесткость ФМП в процессе скольжения. Сдвигающая сила, действующая в подшипнике, вычисляется из:

$$F = \frac{P}{R} \cdot \delta + \mu \cdot P, \quad (11)$$



ГИСТЕРЕЗИСНАЯ ПЕТЛЯ



ПОДШИПНИК

Рис. 3. Свойства ФМП

$f_\delta$  - динамический коэффициент трения;  $D$  - проектное смещение;  $d$  - поперечное перемещение;  $W$  - вертикальная нагрузка;  $F = f_\delta W + [W/R]D$ ;  $R$  - радиус кривизны;  $T$  - период подшипника =  $2\pi\sqrt{R/g}$ ;  $K_i$  = начальная жесткость =  $f_\delta W/D_y$ ;  $K_{эфф}$  = эффективная жесткость =  $F/D$ ;  $K$  = жесткость ФМП =  $W/R$ ;  $T_{эфф}$  = эффективный период =  $2\pi\sqrt{W/K_{эфф}g}$ ;  $\xi$  = эффективное демпфирование =  $(2/\pi)[f_\delta(f_\delta + D/R)]$

где  $\mu$  - коэффициент трения;  $\delta$  - относительное горизонтальное перемещение по подшипнику;  $P$  - сила, нормальная к подшипнику, определяемая выражением:

$$P = W(1 + \frac{\Delta P}{W} + \frac{\ddot{y}}{g}),$$

где  $W$  - статическая нагрузка на подшипник;  $\Delta P$  - приращение силы из-за сферической формы подшипника;  $\ddot{y}$  - вертикальное ускорение.

Первый член выражения (11) - возвращающая сила изолятора, которая определяет наклон кривой сила-перемещение в процессе

скольжения. Второе слагаемое - сила трения между ползуном и вогнутой поверхностью скольжения. Коэффициент трения  $\mu$  является функцией скорости скольжения  $\dot{u}$  и давления в подшипнике [9]:

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \cdot e^{(-a|\dot{u}|)},$$

где  $\mu_k$  - динамический коэффициент трения;  $\mu_s$  - статический коэффициент трения;  $a$  - коэффициент, зависящий от скорости.

Трение быстро возрастает от  $\mu_s$  до  $\mu_k$  при малых скоростях (прибл. 25 мм/с) и при дальнейшем увеличении скорости остается постоянным.

Поскольку вызванные землетрясением смещения возникают первоначально в маятниковых подшипниках, боковые нагрузки и колебательные движения, передаваемые на конструкцию, существенно понижаются.

При применении такого рода материалов обычно используются предельные значения параметров, характеризующих их эксплуатационные свойства – допускаемые статические и динамические контактные давления  $[p_{max}]$ , допускаемая скорость скольжения  $[V_{max}]$  (при фиксированных давлении и температуре), максимальная температура эксплуатации  $[T_{max}]$  [11-13].

Линейная интенсивность изнашивания  $I$  определяется из выражения:

$$I = \frac{dh}{dS} \approx \frac{h}{S},$$

где  $h$  - величина износа,  $S$  – путь трения скольжения.

Для оценки ожидаемого числа циклов или времени работы до отказа используются выражения, в которые входят: линейная интенсивность изнашивания, допустимая величина износа, средний диаметр сферы, амплитуда и частота качания.

Наиболее простые эмпирические зависимости для интенсивности изнашивания выражаются в виде:

$$I = K p^\alpha T^\beta V^\gamma \quad (\alpha, \beta, \gamma) > 0,$$

где  $K, \alpha, \beta, \gamma$  - находятся из экспериментальных данных.

Динамические допускаемые контактные напряжения  $[p_{max.д.}]$  имеют меньшие значения, чем статические  $[p_{max.ст.}]$ .

Ресурс работы сферического подшипника с полимерным вкладышем определяется по формулам

$$T = \frac{0,398[w]}{\bar{I}_h R_1 \beta v} 10^{-2}, N = \frac{14,327[w]}{\bar{I}_h R_1 \beta}$$

где  $\bar{I}_h$  - средняя безразмерная интенсивность изнашивания,  $[w]$  - допустимый износ, величина  $T$  имеет размерность (ч), а  $N$  есть число циклов качания.

Математическая модель, характеризующая процесс изнашивания вкладыша формулируется с использованием методов теории подобия и анализа размерностей, посредством объединения теоретических представлений (фундаментальных уравнений), описывающих природу процесса и экспериментальных исследований и имеет вид:

$$I_h = K(\Phi_1)^{\alpha_1}(\Phi_2)^{\alpha_2} \dots (\Phi_n)^{\alpha_n}.$$

Здесь  $K$  – безразмерный коэффициент,  $\Phi_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) – безразмерные критерии (инварианты), учитывающие сложный комплекс взаимосвязанных физических, химических и механических явлений, протекающих на поверхностях взаимодействующих тел, геометрические факторы, а также контактную ситуацию (кинематику движения, состояние смазочного слоя и поверхностных слоев материалов и т.д.).

Для подшипника с тканым полимерным вкладышем, содержащим нити полиимида и политетрафторэтилена [11,13], предложена детерминистическая формула средней безразмерной интенсивности изнашивания в форме

$$\bar{I}_h = K \left( \frac{\bar{p}}{E_1} \right)^{\alpha_1} \left( \frac{U_g}{R_0 T_g} \right)^{\alpha_2} \left( \frac{\tau_g V_0}{R_1} \right)^{\alpha_3} \left( \frac{T_o}{T_g} \right)^{\alpha_4}, \quad (12)$$

$$K = 6,0 \cdot 10^{-6}, \alpha_1 = 1,3; \alpha_2 = -1,0;$$

$$\alpha_3 = 0,54; \alpha_4 = 0,7.$$

В формуле (12)  $K$  – интегральный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости контртела, особенности технологии и др. факторы;  $\Phi_1 = \frac{\bar{p}}{E_1}$  - деформационный критерий, характеризующий напряженное состояние полимера;  $\Phi_2 = \frac{U_g}{R_0 T_g}$  - инвариант,

описывающий термофлуктуационную природу разрушения полимера, энергетический



барьер разрушения химических связей, свойственный каждому такому материалу;

$$\Phi_3 = \frac{\tau_g V_0}{R_1} - \text{комплекс, моделирующий связь}$$

вязкоупругих свойств полимера с длительностью процесса его деформирования и аналогичный по структуре известному критерию Деборы;  $\Phi_4 = \frac{T_0}{T_g}$  - температурный

симплекс.

Здесь  $\bar{p}$  – среднее максимальное контактное давление за период эксплуатации, имеющее вид:

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \{p(0) + p(T)\}, \quad p(0) = \frac{\Delta}{\mu h} \frac{1 - \cos \alpha(0)}{\cos \alpha(0)},$$

$$p(T) = \frac{P}{\pi R_1^2 \sin \gamma \sin \alpha(T)}.$$

$T_0$  – объемная температура трибосопряжения без учета саморазогрева от трения;  $T_g$  – температура стеклования полимера;  $U_g$  – энергия активации разрушения антифрикционного полимера при  $T_g$ ;  $R_0$  – универсальная газовая постоянная;  $\tau_g$  – время релаксации напряжений полимера при  $T_g$ ;  $V_0 = 6,98 \cdot 10^{-2} \beta \nu R_1$  (м/с) – скорость скольжения точки поверхности шара с координатой  $\varphi = 0$ .

Для определения коэффициента трения используется следующее выражение:

$$f = \frac{K \cdot v_s^a}{p_a^b \cdot T_0^c},$$

где  $K$  – размерный коэффициент, равный  $1,9 \cdot 10^7$ ,  $a, b, c$  – экспериментально определяемые значения. Область использования формулы:  $0 < p_a < 260$  МПа,  $273 < T_0 < 453$  К,  $0,0001 < v_s < 0,04$  м/с.  $a = 0,06$ ,  $b = 0,55$ ,  $c = 3,1$ . Диапазон изменения коэффициента трения в экспериментах составлял  $0,015 \leq f \leq 0,25$ .

#### Применение фрикционных маятниковых подшипников на морских буровых установках

Для трибологических оценок интенсивности изнашивания  $I_u$ , коэффициента трения скольжения  $f$ , ресурса по износу (трибологическому ресурсу)  $T_u$ , необходимо

определить путь трения скольжения на основе относительных смещений ( $S_i$ ), скорости скольжения (смещения), ускорения, нагрузки с учетом динамики процессов, времени протекания землетрясений (длительности), температуры в контакте трения и др.

Предполагается знание материалов трущихся сопряжений, физико-химическое влияние среды и других традиционно учитываемых факторов [11,12].

Динамическая нагрузка при землетрясениях может приводить к остаточным пластическим деформациям фрикционных маятниковых подшипников, утонять антифрикционные накладки, уменьшая эксплуатационные ресурс и надежность узла трения.

В работе акцентировано внимание на землетрясениях, однако, нужно иметь в виду влияние волн (цунами), ветровую нагрузку, ледовые взаимодействия, наличие широкого диапазона температур, коррозионных воздействий морской среды и др. факторов.

По упрощенной модели оценки сейсмостойкости узлов трения воспользуемся методикой Ф. Омори и определим действующую силу на узел:

$$P_\delta = K_\delta \cdot M a_{\max},$$

где  $P_\delta$  – сила, действующая на узел;  $M$  – масса узла;  $a_{\max}$  – максимальное ускорение при землетрясении,  $K_\delta$  – коэффициент динамичности.

Сейсмическое воздействие можно определить из общего уравнения динамики. Обобщенное уравнение движения в матричной форме [4]:

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + C \frac{dX}{dt} + KX = P(t),$$

где  $M$  – матрица масс;  $C$  – матрица демпфирования;  $K$  – матрица жесткости фрикционной системы;  $X$  – вектор обобщенных перемещений;  $\frac{dX}{dt}$  – вектор обобщенных скоростей;  $\frac{d^2 X}{dt^2}$  – вектор обобщенных ускорений;  $P(t)$  – вектор обобщенных внешних сил, зависящих от времени.

Используется спектральный метод оценки сейсмического воздействия.

По результатам натурных сейсмограмм строится спектральная плотность  $G(\omega)$  и корреляционная функция  $K(\tau)$  ускорений грунта, например:

$$G(\omega) = 2\alpha \frac{\omega^2 + m^2}{\omega^4 + 2\alpha\omega^2 + m^4}$$

$$K(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau,$$

где  $\alpha, \beta, \tau$  - параметры;  $m^2 = \alpha^2 + \beta^2$ ;  $\omega$  - частота процесса.

Параметры  $\alpha, \beta, \tau$  во многом зависят от типа грунта. Для скальных, плотных грунтов характерны высокочастотные сейсмические колебания.

Увеличение демпфирующей способности при низкочастотных сейсмически колебаниях проявляется на морских донных осадочных грунтах. Приближенные значения  $\alpha$  и  $\beta$  лежат в следующих пределах  $\alpha \in [6,0; 8,5]$  1/с,  $\beta \in [14,0; 20,0]$  1/с. Рекомендуемые расчетные значения  $\alpha = 7,0$  1/с,  $\beta = 18,0$  1/с.

Строится амплитудно-частотная характеристика максимальных контактных напряжений во фрикционных узлах  $p_k(\omega)$  при кинематическом возбуждении грунта на ряде частот  $\omega$ :

$$X_o = a_c t e^{-\varepsilon_o t} \sin \omega t,$$

где  $X_o$  - перемещение (вертикальное или горизонтальное) основания;  $a_c$  - начальная амплитуда;  $\varepsilon_o$  - параметр затухания перемещения;  $\omega$  - преобладающая частота в сейсмограмме.

По теореме статистической динамики находится спектральная плотность напряжений в узлах от сейсмического воздействия:

$$Sp_k(\omega) = p_k^2(\omega) G(\omega).$$

Определяется дисперсия напряжений от сейсмического воздействия:

$$Dp_k = \int_0^{\infty} Sp_k(\omega) d\omega,$$

при помощи которой можно определить вероятность превышения контактных напряжений в узле трения нормативной величины для принятой пары трения.

#### **Изучение теплового состояния фрикционных маятниковых подшипников**

Правильный выбор антифрикционного материала определяется тепловым состоя-

нием опоры при критических значениях параметров землетрясения. Для сейсмической изоляции применяются маятниковые подшипники скольжения со сферической поверхностью скольжения, а также комбинированные сейсмоизоляторы, состоящие из плоского подшипника скольжения и демпферов иного типа (эластомерные, свинцово-резиновые и др.[8, 9]), возвращающих плоскую опору скольжения в исходное состояние после прекращения сейсмического воздействия.

При исследовании теплового состояния подшипника рассматривалась наиболее простая конструкция маятникового сейсмоизолятора - плоский подшипник скольжения. Схематическое устройство плоского маятникового подшипника скольжения показано на рис.4. В качестве плоской поверхности скольжения используется полированная плита. Шарнирный ползун, как и плита, изготовлены из нержавеющей стали. Плоская поверхность ползуна и сферическая поверхность основания покрыты тонким (0,5...3 мм) слоем подшипникового антифрикционного материала. Рабочие характеристики маятникового подшипника скольжения представлены в таблице 2. В настоящее время разработана широкая гамма антифрикционных самосмазывающихся материалов, применяемых в узлах трения скольжения - в подшипниках скольжения, цилиндрических, сферических шарнирах и др. [11, 13].

Анализ рабочих характеристик исследованных материалов показывает, что ряд покрытий может обеспечивать работоспособность подшипников скольжения и шарниров в экстремальных условиях (в температурных диапазонах от -200°C до +1000°C, при статических нагрузках до 700 МПа, при динамических нагрузках до 260 МПа, при скоростях скольжения до 7 м/с) при удовлетворении требований по износостойкости. Однако очень трудно найти материал, который обладал бы всеми требуемыми оптимальными характеристиками, необходимыми для успешного функционирования маятниковых подшипников скольжения - сейсмоизоляторов по допустимым нагрузкам, скоростям скольжения и максимально допустимым темпе-

ратурные значения коэффициента трения. Большинство материалов предназначено для специфических условий применения, например, при максимальных значениях одного или нескольких параметров (высокие температуры или наличие газовой среды или вакуума), либо для удовлетворения специальным требованиям (высокая несущая способность и низкое значение коэффициента трения и др.).

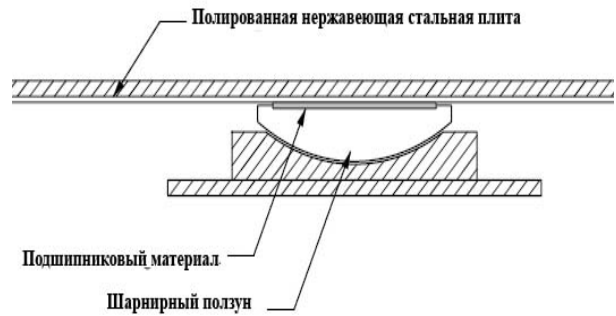


Рис.4. Устройство плоского маятникового подшипника – сейсмоизолятора

Таблица 2 - Рабочие характеристики маятникового подшипника скольжения

Параметр	Пределы изменения параметра
Контактное давление, Р, МПа;	30 ÷ 65
Скорость скольжения, V, м/с;	0,025 ÷ 0,9
Температура окружающей среды, °С	- 40°С ÷ +40°С
Температура в зоне контакта, °С	- 40°С ÷ +450°С
Срок службы, лет	30
Путь трения за 30 лет, м	3000

Наилучшие показатели имеют твердые смазочные покрытия, металлофторопластовые материалы и самосмазывающиеся покрытия на тканевой основе [11]. Каждый из этих трех типов материалов имеет свою оптимальную область применения.

Твердые смазочные покрытия имеют высокую несущую способность, удовлетворительные теплофизические свойства, хорошую адгезию к подложке, высокие показатели износостойкости. Например покрытия на основе MoS<sub>2</sub> имеют хорошие трибологические характеристики при высоких температурах (до 600...700°С в вакууме и 450°С на воздухе). Покрытия выдерживают нагрузки до 140 МПа [13]. Однако, несмотря на высокую износостойкость, ресурс этих покрытий ограничен вследствие малой их толщины (15...50 мкм).

Наиболее широко из самосмазывающихся материалов в подшипниках скольжения и шарнирах применяется металлофторопластовая лента (МФЛ). Этот материал имеет высокие допустимые значения контактных параметров, хорошие теплофизические свойства [14]. Такие материалы применяются при высоких статических (до 350 МПа) и динамических (до 150 МПа) нагрузках, средних скоростях скольжения, в широком

диапазоне температур (-250 ... +280°С). Технология производства МФЛ отработана как для цилиндрических, так и для сферических подшипников скольжения. К недостаткам этого типа материалов можно отнести: повышение коэффициента трения в зависимости от отработанного ресурса подшипника скольжения, что связано с различием структуры материала по глубине антифрикционного слоя, ограниченную величину изнашиваемого слоя (до 200 мкм), а также влияние времени выдержки под нагрузкой на величину коэффициента трения. Известно, что для подшипников, изготовленных из материала DU выдержка под нагрузкой от нескольких часов до нескольких дней приводила к возрастанию статического коэффициента трения на 50...200 % [15].

В последнее время все большее применение находят самосмазывающиеся покрытия на основе тканей из антифрикционных волокон (ПТФЭ, графита) и высокопрочных полиимидных и углеродных волокон. Подшипники с покрытиями этого типа имеют практически самые высокие показатели: высокие допустимые значения статической (до 700 МПа) и динамической (до 260 МПа) несущей способности, приемлемые для шарнирных подшипников скольжения; средние допустимые скорости скольжения; широкий

диапазон рабочих температур (-130...+250°C). Эти покрытия имеют высокую износостойкость, могут работать в агрессивных средах, имеют низкие и устойчивые значения коэффициентов трения.

Сравнение трибологических характеристик указанных трех типов материалов приведено на рис.5 и 6.

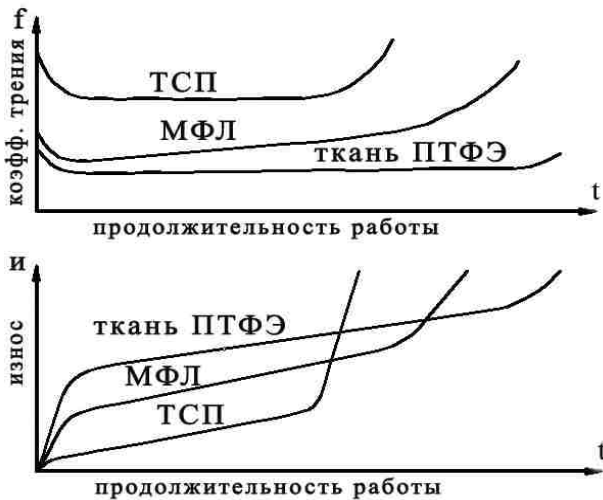


Рис.5. Характерный вид зависимостей трибологических характеристик от продолжительности работы различных типов покрытий

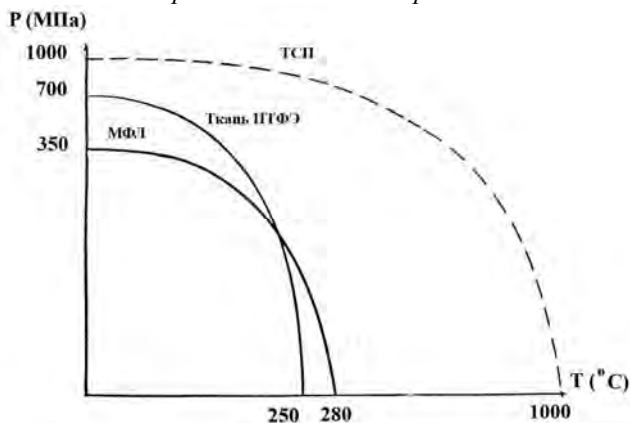


Рис.6. Зависимость несущей способности от температуры для различных типов покрытий

При сравнении свойств трех видов рассмотренных материалов становятся очевидными преимущества композиционных самосмазывающихся тканевых материалов. Материал указанного типа в 80-х годах прошлого века был разработан в СССР и в качестве покрытия для сферических шарниров типа ШЛТ успешно выдержал стендовые и натурные испытания при разработке проекта «Буран» [11].

Таким образом, одним из наиболее перспективных самосмазывающихся материалов для подшипников скольжения –

сейсмоизоляторов в настоящее время является покрытие на основе тканей из волокон полимеров. В связи с тем, что несущая способность и температурная стойкость покрытия зависят, в основном, от соответствующих характеристик компонентов, входящих в состав композиционного материала, эти покрытия имеют перспективы дальнейшего совершенствования механических свойств по мере разработки новых технологий и материалов (в том числе нанотехнологий и наноматериалов).

Изучение литературных источников (в том числе справочной литературы наиболее известных фирм, производящих подшипники скольжения: INA/FAG; Glacier; SKF и др.), а также наш собственный опыт позволили сделать техническую оценку износостойкости значительного количества триботехнических материалов – аналогов материала, используемого в маятниковых подшипниках скольжения.

В результате выполненного анализа было установлено, что износ фрикционного вкладыша при «нормальных» условиях эксплуатации, т.е. при отсутствии сейсмических воздействий, будет небольшим, что позволяет прогнозировать обеспечение заданного срока службы ФМП в указанных условиях (см. табл.2) [16].

При сейсмических воздействиях грунта, нижнего (основания) строения с горизонтальной силой, большей силы трения покоя начинается скольжение в контакте маятникового подшипника.

Возникает удельный тепловой источник  $q = f_{\partial} p_{\partial} v_s$ , где  $p_{\partial}$  – динамическое контактное нормальное напряжение;  $v_s$  – скорость скольжения,  $f_{\partial}$  – коэффициент трения скольжения (динамический). Температура, возникающая в контакте, равная  $t_{\Sigma k} = t_n + \upsilon$ , где  $t_{\Sigma}$  – суммарная контактная температура,  $t_n$  – температура поверхностей перед возникновением контакта трения,  $\upsilon$  – температурный всплеск (вспышка) при трении скольжения во время землетрясения. Температура является функцией теплового источника  $\upsilon \cong \upsilon(q)$ . Температура имеет существенное значение при реализации несущей способности подшипника скольжения, особенно при использовании композиционных

материалов на основе полимеров. Коэффициент трения также зависит от температуры.

Значительные температуры в контакте являются главной причиной повреждения и деградации полимерного материала, вызывают возрастание коэффициента трения и приводят к выходу из строя всего подшипника, который происходит в результате возникновения металлического контакта вкладыша и поверхности скольжения подшипника. Повышение температуры контакта изменяет физические свойства контактирующих материалов. При критических температурах контакта происходит деструкция органических составляющих композиционного материала, возникает катастрофический износ и разрушение подшипника.

Износ антифрикционного покрытия маятниковых подшипников – сейсмоизоляторов в условиях максимальных смещений и скоростей скольжения, будет существенно зависеть от температурного состояния контакта.

Для определения значений прироста поверхностной температуры и распределения температуры по глубине от поверхности скольжения были выполнены численные эксперименты при различных рабочих параметрах с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и результаты расчетов сопоставлялись с лабораторными экспериментами.

Геометрические размеры образцов, теплофизические свойства контактирующих материалов, рабочие параметры (нагрузка, скорость скольжения, время воздействия теплового источника и кинематика движения) были такими же, что и в экспериментах с прототипами плоского подшипника скольжения – сейсмоизолятора [9]. Устройство экспериментального стенда и методика экспериментов описаны в работе [9]. При экспериментальном исследовании плоской опоры скольжения температуру контакта определяли при помощи термопары, установленной в центре контакта близко от поверхности скольжения (на глубине 1,5 мм в стальной плите). В опытах моделировали контакт реального плоского маятникового подшипника скольжения – сейсмоизолятора. В качестве антифрикционного материала использовали ненаполненный политетраф-

торэтилен (ПТФЭ), в качестве контртела – полированную плиту из нержавеющей стали.

### Математическая модель

Скользящий контакт рассматривается как трение между двумя твердыми телами, из которых одно или оба тела движутся с постоянной скоростью мимо имеющего форму полосы теплового источника (рис. 7). Этот источник имеет распределение теплового потока,  $q$ . Каждое тело имеет свои теплофизические константы:  $\lambda$ ,  $a$ ,  $\gamma$ ,  $c$ , - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, плотность и удельную теплоемкость, соответственно.

На рис.7 схематически представлены ключевые параметры, влияющие на распределение тепла в идеальной модели скользящего контакта.  $V_1$  и  $V_2$  - скорости поверхности тела 1 и поверхности тела 2, соответственно, обе скорости направлены по касательной к контакту и по нормали к длине контакта;  $q$  - распределение теплового потока;  $q_1$  и  $q_2$  - части распределения тепла, которое проникает через поверхность тела 1 и поверхность тела 2, соответственно;  $R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны поверхности тела 1 и поверхности тела 2, соответственно;  $L$  и  $W$  - длина и ширина, соответственно, теплового источника. Уравнение теплопроводности (дифференциальное уравнение с частными производными) имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T$$

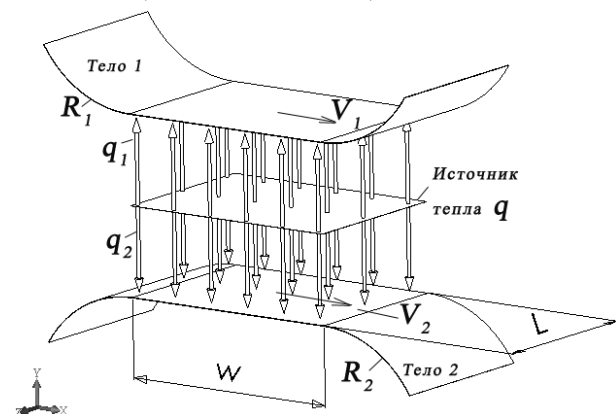


Рис. 7. Расчетная схема

Для получения решения методом конечных элементов указанные уравнения представляются в матричной форме [18].

Чтобы получить решение задачи, необходимо задать краевые условия:

1. В зоне контакта тел отсутствует температурный скачок  $t_1 = t_2$  при  $z = 0$ ,  $\tau > 0$ , где  $\tau$  - время,  $t_1$  - температура поверхности тела 1,  $t_2$  - температура поверхности тела 2 [17].
2. На границе контактирующих тел действует постоянный тепловой поток  $q = q(x, y, z, \tau)$ ; потоки тепла, поступающие в каждое из контактирующих тел  $q_1$  и  $q_2$ , в сумме равны удельной мощности трения, возникающей в контактной области. В общем случае в программных пакетах, использующих МКЭ (таких как, например, ANSYS), тепловой поток в первую поверхность определяется, как  $q_1 = K_p f P V$ , во вторую -  $q_2 = (1 - K_p) f P V$ , где  $K_p$  - коэффициент разделения тепловых потоков между трущимися поверхностями.
3. Учитывая, что политетрафторэтилен относится к теплоизолирующим материалам с низкими, по сравнению с нержавеющей сталью, коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, можно с высокой степенью точности принять  $K_p = 1$ .
4. Важно также учесть, что для пары трения полированная сталь — ПТФЭ фактическая площадь контакта близка к контурной [9].

Тепловой поток, выделенный при трении, в общем случае не постоянный и зависит от времени и координат. Это обусловлено зависимостями силы трения (на единицу площади) от закона движения и распределения нормальной нагрузки. Поэтому при постановке задачи используется среднее постоянное значение теплового потока,  $q_{cp}$ , так чтобы оценка роста температуры была усреднена по номинальной площади контакта.

В рассматриваемом случае, также как в эксперименте, одно из тел неподвижно, а другое совершает возвратно-поступательное скольжение. Кроме того, амплитуда движущегося тела мала по сравнению с радиусом номинальной площади контакта. В связи с этим, можно принять, что в среднем движущееся тело получает постоянный тепловой поток в процессе движения. Однако это ограничение не является обязательным, так как нельзя исключать случаев, когда амплитуда движения тела будет выходить за пределы номинальной площади контакта.

Будем рассматривать кратковременные интервалы времени действия теплового по-

тока, чтобы решение было справедливо для теплового потока, целиком идущего в трущиеся тела, без потерь на радиацию и конвекцию.

Программный комплекс ANSYS предназначен для численного решения научных и технических задач, математическая модель которых описывается дифференциальными уравнениями с частными производными. В нашем случае используются дифференциальные уравнения теплопроводности, описывающие явления теплообмена и теплопередачи.

Основой теплового анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, полученное в соответствии с принципом сохранения энергии; в результате решения задачи получаем поле температуры, которое затем используется для определения других тепловых параметров. На рис. 8 показано разбиение контактирующих тел на конечные элементы.

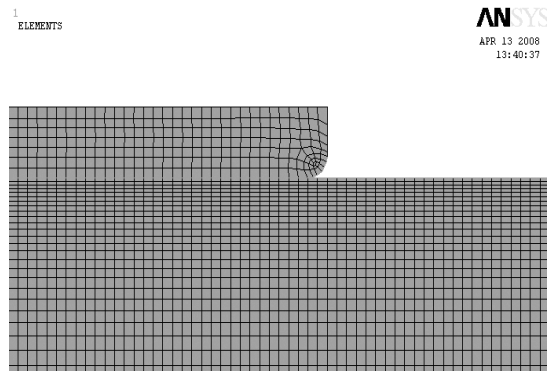


Рис. 8. Фрагмент модели

Условия экспериментов и результаты сравнения расчетов и эксперимента представлены в таблице 3 и таблице 4 (приросты температуры). Отличия между экспериментальными и расчетными значениями суммарной температуры на глубине 1,5 мм от поверхности контакта составляют не более 10...25 %. На рис. 9, 10, 11 показаны расчетные распределения температур (с учетом температуры окружающей среды) по глубине стального образца, полученные в проведенных в работе численных экспериментах. Расчетные температуры на поверхности контакта и на глубине 1,5 мм от поверхности сопоставляются с температурой, измеренной термопарой в соответствующих реальных экспериментах. Эксперимент № 3 проводился в условиях, существенно отличающихся

от остальных – по величине окружающей температуры, по скорости скольжения и длительности испытания. Этим, по-видимому, и объясняются более значительные отклонения расчета и эксперимента, нежели в других случаях. Как отмечалось

выше, при постановке задачи принималось, что длительность действия теплового источника относительно кратковременная, поэтому решение является справедливым для теплового потока, целиком идущего в трущиеся тела, без потерь на радиацию и конвекцию.

Таблица 3 - Исходные данные, описывающие условия экспериментов [9]

№ эксперимента	Диаметр образца (ПТФЭ), мм	Число циклов N	Путь трения, м	Коэффициент трения, среднее значение за N циклов	Длительность эксперимента, с	Скорость, м/с	Частота качаний, 1/с	Контактное давление, МПа
1	95	3,25	0,3302	0,098	1,62	0,2	12,57	20,7
2	95	3,25	0,1651	0,104	1,62	0,1	12,57	20,7
3	95	3,25	0,1651	0,036	102	0,002	0,2	20,7
4	254	5	1	0,065	15,7	0,064	2	20,7

Таблица 4 - Сравнение результатов экспериментов с расчетными результатами (прирост температуры)

№ эксперимента	Температура окружающей среды, град.С	Прирост температуры, град.С		
		На глубине 1,5 мм		На поверх
		Измер.	Расчет МКЭ	
1	22	50	43,4	75,3
2	21	29	22,5	39,3
3	49	1	2,2	2,3
4	22	51	41,0	48,4

оценить сейсмические ускорения, скорость и смещение – кинематические параметры движения грунта как функции уровней сейсмической интенсивности.

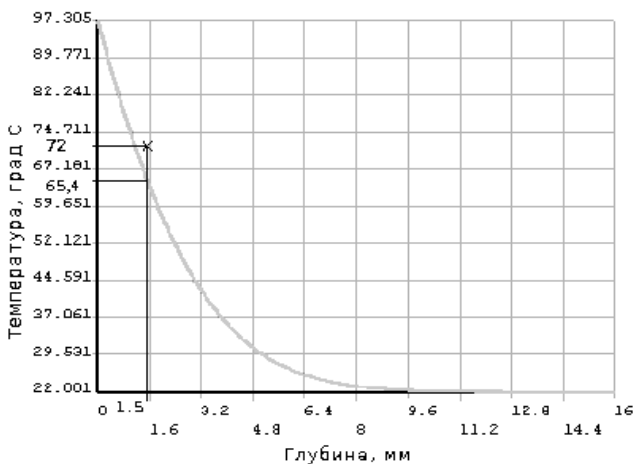


Рис. 9. Расчетное распределение суммарной температуры по глубине (x-эксперимент №1). Вертикальной линией отмечена точка, в которой производился замер температуры

Для очень больших интервалов времени тепло будет передаваться в поперечном направлении к более холодным частям движущегося тела, и будет также расходоваться в результате радиации и конвекции, что необходимо в дальнейшем учитывать при постановке задачи.

Таким образом, представленные системы уравнений позволяют приближенно

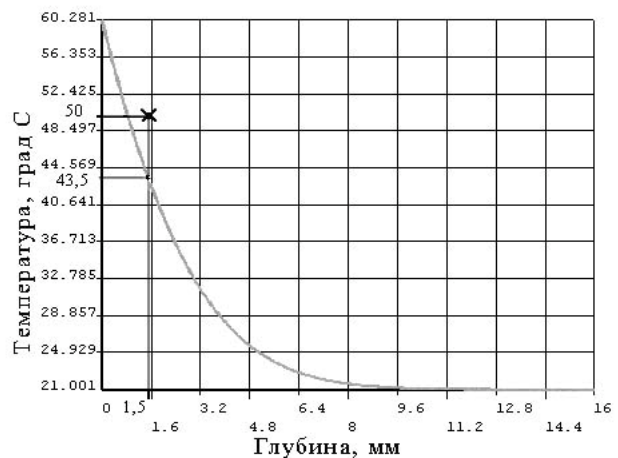


Рис. 10. Расчетное распределение суммарной температуры по глубине (x-эксперимент №2). Вертикальной линией отмечена точка, в которой производился замер температуры

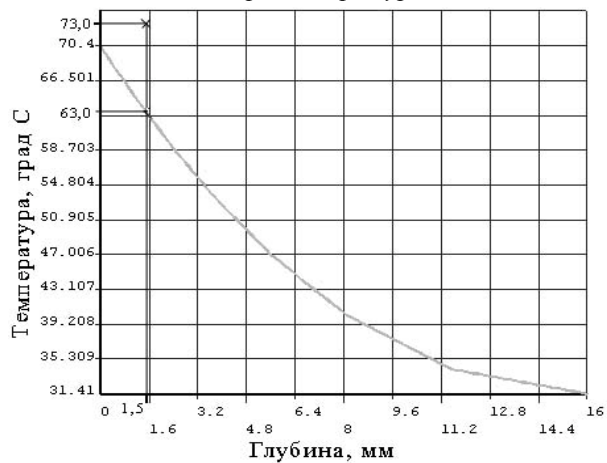


Рис. 11. Расчетное распределение суммарной температуры по глубине (x-эксперимент №4). Вертикальной линией отмечена точка, в которой производился замер температуры

Используя строительные нормы и правила для сейсмических районов [6], приведенные здесь соотношения, можно установить статические и динамические нагрузки (нормальные и тангенциальные), действующие в фрикционных сейсмоизоляторах.

Оценив скорость скольжения в контакте, контактные напряжения, температуру, можно рассчитать коэффициент трения скольжения.

Средняя безразмерная интенсивность изнашивания находится по указанному уравнению [11,12], путь трения определяется экспериментально или приближенно, исходя из кинематики и динамики контакта, времени землетрясения. Определяется ресурс нормального функционирования фрикционных маятниковых подшипников скольжения.

Сейсмическая интенсивность влияет на термосиловую нагруженность, кинематику, ресурс и диссипативные процессы в подшипниках – сейсмоизоляторах. Выполненные вычисления и сравнение полученных результатов расчетов и экспериментов показывают, что разработанный метод расчета удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Метод расчета позволяет выполнять вычислительные эксперименты в широком диапазоне рабочих параметров нагружения и условий теплоотвода, а также прогнозировать температуру в зоне контакта и на глубине под поверхностью контакта, что дает возможность оценивать тепловое состояние контакта и подбирать антифрикционные материалы по их температурной стойкости.

#### Библиографический список

1. Природные опасности России. Сейсмические опасности./ Под общ. ред. Осипова В.И., Шойгу С.К. / М.: Изд-во «Крук», 2000.
2. Мазур И.И., Иванов О.П. Опасные природные процессы. Учебник. М.: «Экономика», 2004. С. 702.
3. Баринов А.В.. Чрезвычайные ситуации природного характера и защита от них. М.: Владос-Пресс, 2003. С. 496.
4. Морские инженерные сооружения. Ч. 1. Морские буровые установки. Учебник /

Борисов Р.В., Макаров В.Г., Макаров В.В. и др. / СПб. Судостроение, 2003 С. 535с.

5. Инагамов Р.Ш. Новая версия шкалы оценок сейсмической интенсивности. Проблемы оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и прогноза землетрясений. А.Н. Республики Узбекистан. Материалы междунар. науч. Конф. -Ташкент, 7-8.10.2004. С. 63-66.

6. Строительство в сейсмических районах. СН и ПП-7-81. Издание официальное. М. 2006. С. 45.

7. Физический энциклопедический словарь. Гл. редактор А.М. Прохоров.: М.: «Советская энциклопедия» 1983. С. 944.

8. United States Patent N 4,644,714 Victor A. Zayas. Earthquake protective column support, 1987.

9. Constantinou M.C., Mokha A.S., Reinhorn A.M. (1990) “Experimental and Analytical Study of a Combined Sliding Disc Bearing and Helical Steel Spring Isolation System”, Report NCEER-90-0019, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.

10. Clarke C.S.J., Buchanan R., Efthimiou M., Shaw C. Structural Platform Solution for Seismic Arctic Environments – Sakhalin II Offshore Facilities. 2005 Offshore Technology Conference -17378-PP. P. 21.

11. Машиностроение, Энциклопедия, том IV-1, Главный редактор Решетов Д.Н. М.: Машиностроение, 1995. С. 237.

12. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. С. 292

13. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. М: Машиностроение,1986.p.223, (in Russian).

14. Семенов А.П., Савинский Ю.Э. Металлофторопластовые подшипники. М: Машиностроение , 1976.p.190, (in Russian).

15. Garlock Bearings, Inc.(1987), «DU Self-Lubricating Bearings», Catalog 781-C, Thorofare, New Jersey.

16. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Пучков В.Н. Трибологические характеристики фрикционных сейсмоизоляторов маятникового типа // Трение и износ, № 2, 2007, V.28, p.119-127, (in Russian.)



17. Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. John Wiley and Sons, Inc. New York/London/Sydney/Toronto. p.1976.

18. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. С. 441. (in Russian.)

### References

1. Natural danger of Russia. Seismic danger. / Ed. Osipov V.I., Shoigu S.K. / M.: Kruk, 2000, (in Russian).

2. Mazur I.I., Ivanov O.P. Natural dangerous processes. Textbook. M.:Economics, 2004.p. 702. (in Russian).

3. Barinov A.V. Extraordinary situations of natural character and defence from it. M. Vldos-Press, 2003. p. 496. (in Russian).

4. Naval engineers building. Pt.1. Naval boring plant. Textbook./ Borisov R.V., Makarov V.G., Makarov V.V. e.a.//SPb: Sudostroenie, 2003 p.535. (in Russian).

5. Inagamov R.Sh. New version of seismic intensity estimation. Problems of seismic dangers and seismic risk estimations and prediction of earthquake. Uzbek Science Academy. Transactions of International scientific Conference. Tashkent, 7-8.10.2004. P.63-66.

6. Building in seismic regions. SN i PP.-7-81. Official Edition. M. 2006. p. 45. (in Russian).

7. Physical encyclopedic handbook. Ed. Prochorov A.M. M.: Sovetskaja enciklopedija, 1983, . p. 944. (in Russian).

8. United States Patent N 4,644,714 Victor A. Zayas. Earthquake protective column support, 1987.

9. Constantinou M.C., Mokha A.S., Reinhorn A.M. (1990) "Experimental and Analytical Study of a Combined Sliding Disc Bearing and Helical Steel Spring Isolation System", Report NCEER-90-0019, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.

10. Clarke C.S.J., Buchanan R., Efthimiou M., Shaw C. Structural Platform Solution for Seismic Arctic Environments – Sakhalin II Offshore Facilities. 2005 Offshore Technology Conference -17378-PP. P. 21.

11. Mashinostroenie, Encyclopedia, vol. IV-1, Ed.. Reshetov D.N. M.: Mashinostroenie, 1995. p. 237, (in Russian).

12. Kogaev V.P, Drozdov Y.N. Strength and wearresisting of machine detailes. M.: Visshaja shkola, 1991. p. 292, (in Russian).

13. Drozdov Y.N., Pavlov V.G, Puchkov V.N. Friction and wear in extreme conditions M: Mashinostroenie, 1986.p.223, (in Russian).

14. Semionov A.P., Savinski Yu.E. Fluoroplastic Metal Bearings M: Mashinostroenie, 1976.p.190, (in Russian).

15. Garlock Bearings, Inc.(1987), «DU Self-Lubricating Bearings», Catalog 781-C, Thorofare, New Jersey.

16. Drozdov Y.N., Nadein V.A, Puchkov V.N. Tribological characteristic of friction seismic pendulum insulator // Trenie i iznos, № 2, 2007, V.28, p.119-127, (in Russian.)

17. Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. John Wiley and Sons, Inc. New York/London/ Sydney/Toronto. p.1976.

18. Likov A.V. Thermal Conductivity. M.: Vischaya shkola. 1967, P.441. (in Russian.)

## INFLUENCE OF EARTHQUAKE PARAMETERS ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FRICTION PENDULUM BEARINGS (SEISMO INSULATORS)

©2009 Y. N. Drozdov<sup>1</sup>, V. A Nadein<sup>2</sup>, V. N. Puchkov<sup>1</sup>, M. V. Puchkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute, Moscow

<sup>2</sup>OGS – Energiagnostika, Moscow

Frictional pendulum bearings (FPB) have the universal properties satisfying various requirements at operation of buildings, bridges and industrial constructions. The dynamic periods of oscillations from 1 up to 5 s, displacement up to 1,5 m, high bearing capacity and damping can be provided. Bearings can maintain vertical loading up to 13,5 thousand tons and have the minimal cost of a structure. In the paper the information on influence of earthquakes and other forces influenced on FPB characteristics, used as seismo-insulators in oil platforms of the project "Sakhalin - 2" are represented.

*Earthquake, seismo-insulation, friction, pendulum sliding bearings, antifrictional materials, tribological properties, thermal condition, lifetime*

### Информация об авторах

**Дроздов Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Института машиноведения им. А.А.Благонравова Российской Академии наук. Область научных интересов: трибология, контактная гидродинамика, теплофизика, диффузионные явления на смазанном контакте, долговечность.

**Надеин Владимир Александрович**, Генеральный директор - президент ООО НГБ-«Энергодиагностика». Область научных интересов: риски, безопасность сложных технических систем, эффективность газо- и нефтедобычи.

**Пучков Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии наук. Область научных интересов: трибология, граничная смазка, твердые смазочные покрытия, экстремальные условия.

**Пучков Михаил Владимирович**, научный сотрудник Института машиноведения им. А.А.Благонравова Российской Академии наук. Область научных интересов: трибология, самосмазывающиеся материалы, тепловые расчеты, контактные задачи.

**Drozдов Yurii Nikolaevich**, Doctor of Technical Science, Head of Tribology Department of Mechanical Engineering Research Institute of Russia Academy of Science. Area of Research: tribology, contact hydrodynamic, thermal physic, diffusion phenomena in lubricated contact, life time.

**Nadein Vladimir Alexandrovich**, General Director–Prezident of OGS-Energodiagnostika. Area of Research: industrial and environmental safety, maintenance and reliability in gas and oil-industry.

**Puchkov Vladimir Nikolaevich**, Candidate of Technical Science, Head of Laboratory “Wear at Boundary Lubrication” of Mechanical Engineering Research Institute of Russia Academy of Science. Area of Research: tribology, boundary lubrication, solid lubricant, antifrictional materials, extreme conditions.

**Puchkov Michail Vladimirovich**, Scientist of Mechanical Engineering Research Institute of Russia Academy of Science. Area of Research: tribology, selflubricating materials termal calculation, contact problem.